

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

Я. Чэнь

yangyangchen@mail.ru

П.П. Маунт

pyaephyo@mail.ru

Г.В. Малышева

malysheva@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены методика и пример расчета баллона высокого давления, изготовленного из углепластика по технологии намотки и предназначенного для использования в конструкциях беспилотных летательных аппаратов. Особенность конструкции баллона заключается в переменной толщине, вследствие чего могут возникнуть градиенты температур, остаточные напряжения и уменьшиться прочность. Предложена методика оценки значений кинетики процесса отверждения, учитывающая влияние выделяемого количества теплоты. Моделирование проведено в программе ESI PAM-RTM. Установлено, что на начальном этапе процесса отверждения температура и степень отверждения в тонкой части изделия выше, чем аналогичные характеристики в его толстой части. С повышением степени отверждения в результате экзотермической реакции происходит изменение температурных полей, что приводит к увеличению значений температуры и степени отверждения на участках изделия большей толщины. Для выравнивания значений градиентов температур и степени отверждения на всех участках изделия предлагается проводить нагрев с различной скоростью. В результате проведенных исследований установлены оптимальные технологические режимы, обеспечивающие минимальные значения градиентов температур

### Ключевые слова

*Углепластик, баллон, моделирование, кинетика, градиент температур, отверждение*

Поступила 26.02.2020

Принята 14.04.2020

© Автор(ы), 2020

---

**Введение.** При изготовлении изделий во многих отраслях промышленности, в том числе в авиастроении и ракетно-космическом производстве, наблюдается увеличение использования полимерных композитов в качестве конструкционных материалов [1–3]. Основными преимуществами та-

ких конструкций (по сравнению с металлическими) являются высокие удельные характеристики (удельные прочность и жесткость), длительная стойкость к агрессивным средам, хорошие трибологические свойства и другие [4–6].

Особенность композитных конструкций заключается в существенной зависимости их качества от технологии формования. Например, в процессе отверждения конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) имеет место выделение теплоты, количество которой зависит от кинетики процесса нагрева и теплофизических свойств используемых материалов. Выделяемая теплота фактически является внутренним источником нагрева композитной конструкции, который оказывает существенное влияние на распределение температурных полей [7, 8].

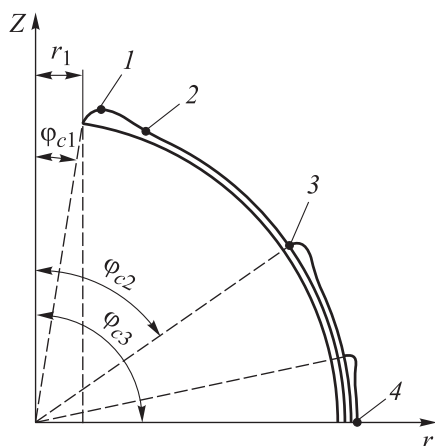
Еще одним важным технологическим фактором является изменение агрегатного состояния терморезактивного связующего в процессе его отверждения, что приводит к соответствующему изменению всех его теплофизических характеристик, что также существенно влияет на кинетику процесса нагрева и, следовательно, на качество формируемых деталей.

Проблеме исследования кинетики процессов отверждения конструкций из ПКМ уделяется большое внимание, особенно если решаются вопросы разработки технологии формования крупногабаритных изделий сложной геометрической формы [9–11], поскольку в процессе отверждения таких конструкций имеет место изменение температурных полей. Из-за неравномерного нагрева возникают остаточные напряжения и усадка, что приводит к снижению механических характеристик ПКМ.

*Цель настоящей работы* — исследование кинетики процесса отверждения баллона высокого давления из углепластика на основе эпоксидного связующего.

**Объекты и методы.** В настоящей работе в качестве объекта исследования выбран баллон высокого давления, используемый в комплексе беспилотного летательного аппарата [12, 13]. Этот тип транспортного средства может выполнять функции псевдоспутника, который эксплуатируется на низких орбитах (17...20 км), что обеспечивает существенно более высокую точность измерений.

При изготовлении баллона использована технология мокрой намотки с углами (рис. 1):  $\pm 5^\circ$  — первая зона,  $\pm 5^\circ / \pm 53,5^\circ$  — вторая зона,  $\pm 5^\circ / \pm 53,5^\circ / \pm 78^\circ$  — третья зона. В цилиндрической части баллона схема намотки следующая:  $\pm 5^\circ / \pm 53,5^\circ / \pm 78^\circ / \pm 90^\circ$ . Расчет углов намотки и геометрических размеров оболочки проводили по методике, приведенной в [14]. Установлено, что днище баллона по сечению имеет разную толщину,



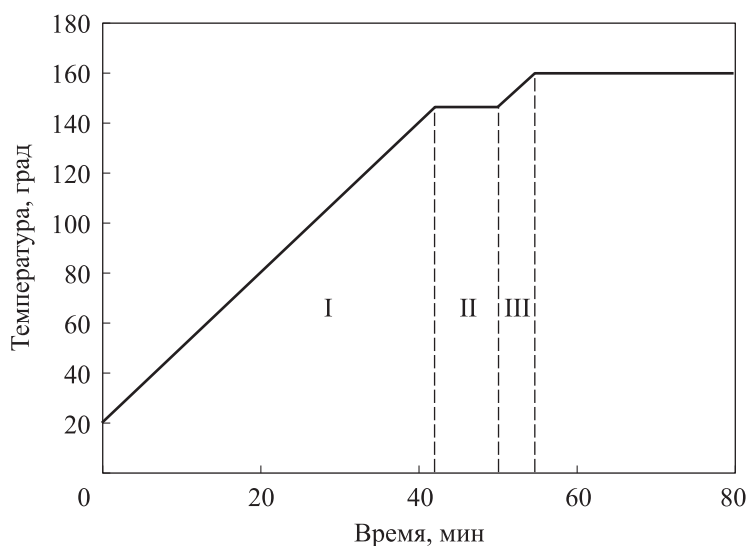
**Рис. 1.** Схема днища баллона с углами намотки и характерными точками на поверхности

которая изменяется от 1,9 мм в точке 3 до 18,1 мм в точке 1. Толщина баллона в цилиндрической части (в точке 4) составляет 4,5 мм.

В настоящей работе выполнена оценка значений температур, степени отверждения и интенсивности тепловыделения на различных участках баллона. Для удобства анализа результатов моделирования по контуру баллона нанесены четыре точки (см. рис. 1), используемые далее для обозначения участков контура днища, на которых определяются искомые значения температур, степени отверждения и интен-

сивность тепловыделения.

На рис. 2 приведена кривая заданного режима отверждения, на которой выделены участки: I — нагрев до температуры гелеобразования, II — выдержка при температуре гелеобразования и III — нагрев до заданной температуры отверждения.



**Рис. 2.** Режим отверждения

Основные геометрические характеристики баллона, для изготовления которого использованы эпоксидное связующее марки ЭХД и ткань на основе углеродного волокна марки Т300, следующие: длина 2,18 м, дли-

на цилиндрической части 1,71 м, толщина элементарного слоя 0,15 мм. Для расчета геометрических размеров (максимальных и минимальных) толщин баллона использована стандартная методика [14].

Моделирование процесса отверждения баллона проводили в программе ESI PAM-RTM. Все расчеты выполнены при скорости нагрева 3 °С/мин.

Для анализа теплообмена в процессе отверждения в работе использовано общее уравнение теплопроводности с учетом конвекции и экзотермических эффектов:

$$\rho C_p (\beta) \frac{dT}{dt} = Q_\lambda + Q_\alpha + Q_V; \quad (1)$$

$$Q_\lambda = \lambda_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 2\lambda_{xz} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} + \lambda_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (2)$$

$$Q_\alpha = \alpha (T_0 - T) \frac{S}{V}; \quad (3)$$

$$Q_V = \rho H_r \frac{d\beta}{dt}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность используемого ПКМ;  $C_p$  — удельная теплоемкость;  $\beta$  — степень отверждения;  $T$  — абсолютная температура образца;  $t$  — время;  $Q_\lambda$  — тепловой поток;  $Q_\alpha$  — конвективный тепловой поток;  $Q_V$  — скорость объемного тепловыделения;  $\lambda_{xx}$ ,  $\lambda_{xz}$ ,  $\lambda_{zz}$  — теплопроводности анизотропного материала вдоль осей  $X$ ,  $XZ$  и  $Z$ ;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_0$  — температура окружающей среды;  $S$  — площадь действия конвективного потока;  $H_r$  — количество теплоты, выделяемой в процессе отверждения.

Для используемого ПКМ значения коэффициентов в уравнениях (1)–(4) составили: 600 Дж/(кг · К) и 2 Вт/(м · К) — теплоемкость и теплопроводность углеродной ткани; 50 Вт/(м<sup>2</sup> · К) — коэффициент теплоотдачи;  $3,1 \cdot 10^5$  Дж/кг — количество теплоты, выделяемой в процессе отверждения.

По методике, приведенной в [15], определены значения теплоемкости и теплопроводности связующего (табл. 1) в зависимости от степени его отверждения.

Таблица 1

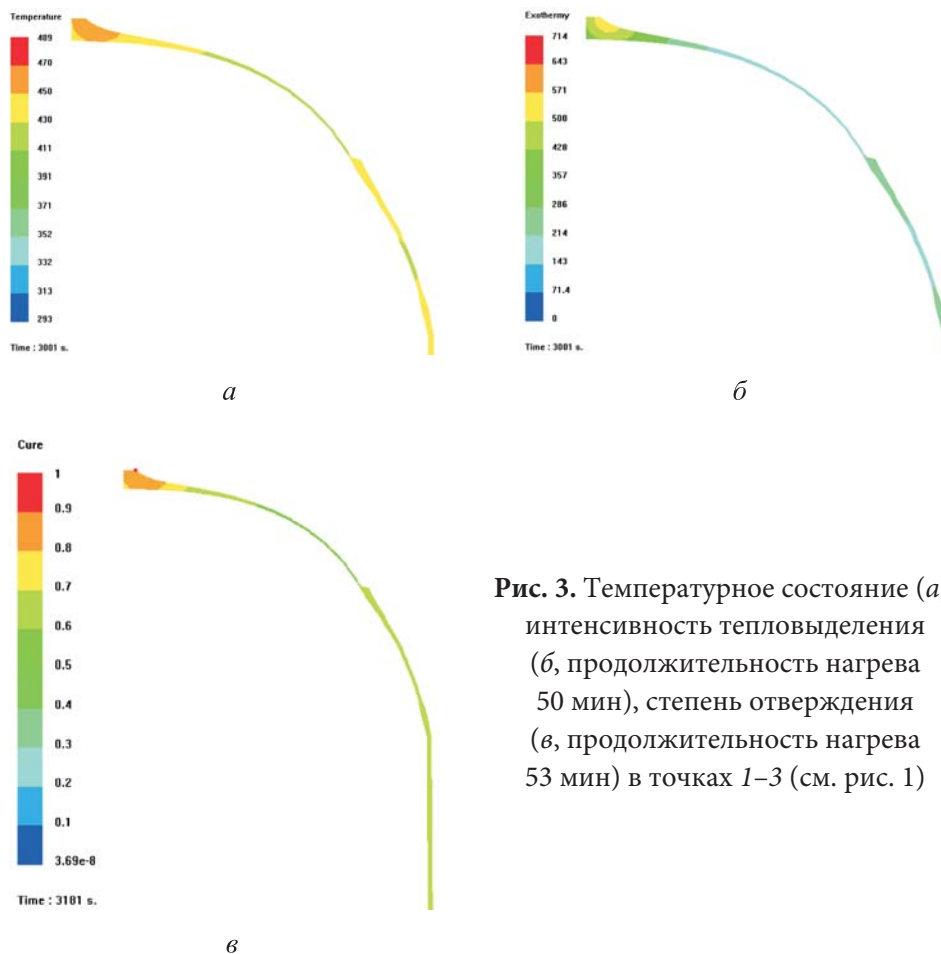
**Теплофизические характеристики связующего**

Степень отверждения, %	Теплоемкость, Дж/(кг · К)	Теплопроводность, Вт/(м · К)
0	1 970	0,08
5	1 970	0,08
15	1 920	0,14

Окончание табл. 1

Степень отверждения, %	Теплоемкость, Дж/(кг · К)	Теплопроводность, Вт/(м · К)
30	1 820	0,2
75	1 400	0,22
90	1 340	0,25
100	1 300	0,27

**Результаты и обсуждение.** С использованием данных табл. 1 определены значения температур, степени отверждения и интенсивности тепловыделения в различные моменты времени. Анализ полученных результатов показал, что в процессе отверждения имеет место неравномерный нагрев не только по контуру днища баллона, но и по толщине (рис. 3). Наибольшие значения температур зафиксированы в точке 1.



**Рис. 3.** Температурное состояние (а), интенсивность тепловыделения (б, продолжительность нагрева 50 мин), степень отверждения (в, продолжительность нагрева 53 мин) в точках 1–3 (см. рис. 1)

При увеличении продолжительности нагрева, например с 8 до 50 мин, (см. рис. 3) имеет место не только повышение температуры, но и увеличение площади неравномерно нагретых поверхностей. Аналогичным образом изменяется степень отверждения. Например, на рис. 3, в видны участки в районе точки 3, на которых степень отверждения ниже, чем на участках в районе точки 1.

В результате расчетов установлено, что чем больше толщина, тем большее количество теплоты выделяется в процессе отверждения. Дополнительный тепловой поток, значение которого выше на более толстом участке днища, приводит к увеличению скорости повышения температур и степени отверждения. Например, начиная с 50 мин процесса отверждения (рис. 3, в), в точках 1 и 2 появляется дополнительный тепловой поток, что приводит к увеличению скорости нагрева (рис. 4). Известно [16], чем выше скорости

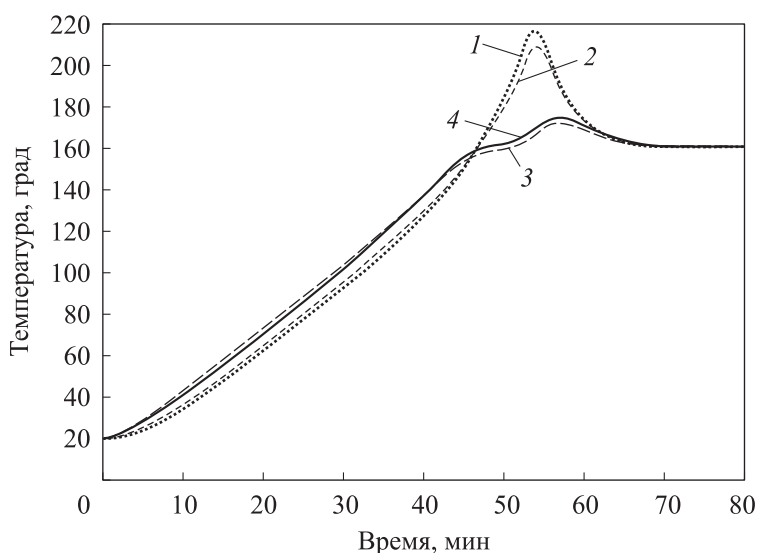
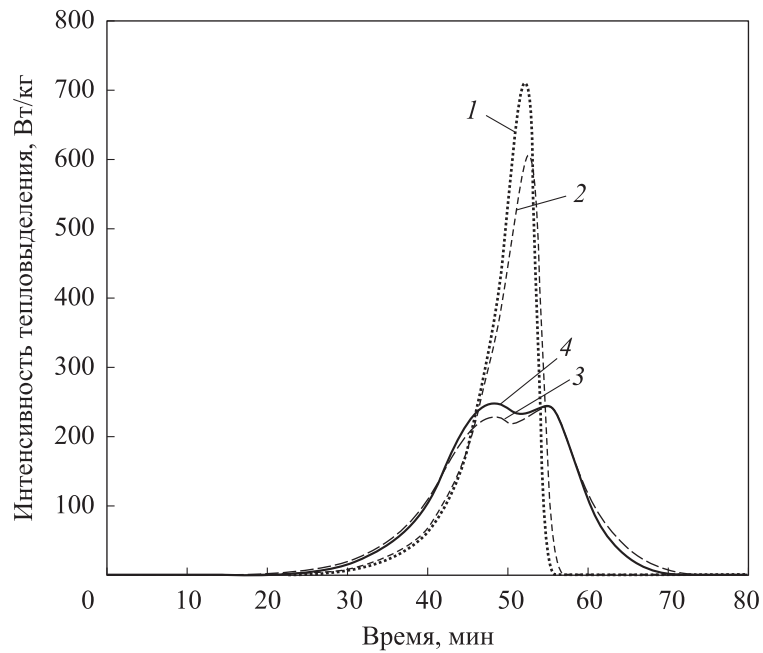


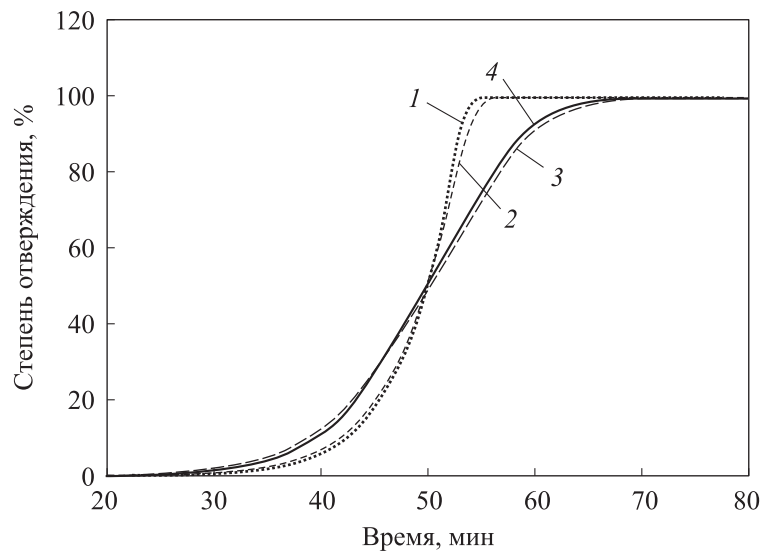
Рис. 4. Температурное состояние в точках 1–4

нагрева, тем больше интенсивность тепловыделения, что хорошо согласуется с полученными результатами. На рис. 5 видно, что в точке 1 (участок максимальной толщины) интенсивность тепловыделения также имеет максимальное значение. В точках 3 и 4 толщина, наоборот, минимальна, что приводит к уменьшению интенсивности тепловыделения. Аналогичным образом изменяется степень отверждения (рис. 6).

На рис. 7 приведены полученные в результате моделирования значения градиента температур по толщине. Результаты полностью согласуются



**Рис. 5.** Зависимость интенсивности тепловыделения от времени в процессе отверждения баллона в точках 1–4



**Рис. 6.** Степень отверждения в точках 1–4

с ранее найденными значениями температур, при увеличении толщины имеет место повышение градиента температур. Для удобства анализа результаты приведены в табл. 2.

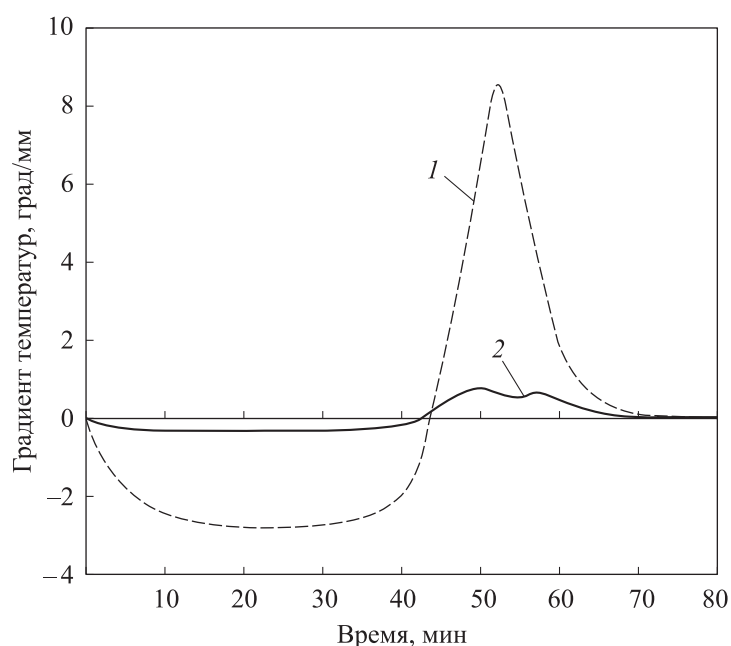


Рис. 7. Зависимость градиента температур от времени на различных участках баллона, в точках 1 и 3

Таблица 2

**Кинетические параметры процесса тепловыделения**

Параметры	Участки поверхности			
	1	2	3	4
Толщина, мм	18,1	9	1,9	4,5
Время, мин:				
начала химической реакции	20,5	19,5	16,9	17,2
окончания химической реакции	55,2	56,7	71,9	70,3
максимальной скорости химической реакции	52,1	52,5	54,8	48,2
Интенсивность тепловыделения, Вт/кг	712,2	608,3	245,1	248,3
Максимальное значение температуры, °С	215,9	208,8	172,0	174,3

Анализ полученных результатов показал, что максимальное количество теплоты выделяется в точке 1, минимальное — в точке 3. Таким образом, температурное поле по контуру днища изменяется нелинейно, значение температуры уменьшается от точки 4 до точки 3, далее температура на поверхности детали увеличивается от точки 3 до точки 2 и на участке от точки 2 до точки 1. Аналогичным образом изменяется степень отвер-



ждения. При увеличении толщины конструкции из-за увеличения плотности теплового потока максимальные значения температуры и интенсивности тепловыделения повышаются, что требует проводить нагрев с минимальной скоростью.

Для обеспечения более равномерного распределения температур по длине и толщине баллона, проведено моделирование при меньшей скорости нагрева, значения которой на I и III участках (см. рис. 2) составили 3 и 1 К/мин. Предлагаемый режим нагрева приводит к увеличению на 5 % продолжительности отверждения, однако, снижает на 8 и 11 % значения градиентов температур по толщине и длине.

**Заключение.** Проведен расчет технологии процесса отверждения баллона с учетом количества выделяемой теплоты в зависимости от скорости процесса нагрева. Показано влияние тепловых полей на изменение степени отверждения. В результате проведенных расчетов установлено, что температура (следовательно, и степень отверждения) по контуру дна баллона изменяется нелинейно и зависит от его толщины. На основании полученных результатов предложено оптимизировать кинетику процесса отверждения таким образом, чтобы обеспечить минимальное значение градиентов температур по толщине баллона. Для выравнивания значений градиентов температур и степени отверждения предлагается проводить нагрев на первом и третьем участках с различной скоростью, что позволит снизить значения градиентов температур по толщине и длине баллона.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Резник С.В., Просунцов П.В., Новиков А.Д. Перспективы повышения размерной стабильности и весовой эффективности рефлекторов зеркальных космических антенн из композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 1, с. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-71-83>
- [2] Васильев В.В., Тарнопольский Ю.М. Композиционные материалы. М., Машиностроение, 1990.
- [3] Зуев А.С., Емашев А.Ю., Шайдунова Г.И. Анализ особенностей изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки. Формообразующие оправки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 3, с. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2018-3-4-13>
- [4] Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Лукина Н.Ф. и др. Исследование эпоксидно-полисульфоновых полимерных систем как основы высокопрочных клеев авиационного назначения. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2017, № 3, с. 7–12.

- [5] Резник С.В., Просунцов П.В., Михайловский К.В. и др. Моделирование прогрева связующего полимерных композиционных материалов с использованием СВЧ-излучения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-12-83-92>
- [6] Иванов Н.В., Гуревич Я.М., Хасков М.А. и др. Изучение режима отверждения связующего ВСЭ-34 и его влияния на механические свойства. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 2, с. 50–55.
- [7] Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Чуцкова Е.Ю. и др. Отверждение многослойных полимерных композиционных материалов. Часть 2. Формование толстостенной плиты стеклопластика. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2018, № 6, с. 7–14.
- [8] Баринов Д.Я., Майорова И.А., Мараховский П.С. и др. Математическое моделирование температурных полей при отверждении толстостенной плиты стеклопластика. *Перспективные материалы*, 2015, № 4, с. 5–14.
- [9] Беляков Е.В., Тарасов В.А., Боярская Р.В. Выбор режимов формования композитных конструкций ракетно-космической техники. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 5, с. 37–43.
- [10] Borodulin A.S., Marycheva A.N., Malysheva G.V. Simulation of impregnation kinetics of fabric fillers in the production of fiberglass articles. *Glass Phys. Chem.*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 660–664. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1087659615060036>
- [11] Маунг П.П., Малышева Г.В. Моделирование кинетики процесса пропитывания при производстве рефлекторов зеркальных космических антенн из углепластиков. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 5, с. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-5-38-47>
- [12] Romeo G., Danzi F., Cestino E., et al. Design and optimization of a composite vessel for hydrogen storage subject to internal pressure and in-flight loads for UAVs. *IJAS*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 124–137.
- [13] Xiao X., Wang J., Huang J., et al. A new approach to study terrestrial yardang geomorphology based on high-resolution data acquired by unmanned aerial vehicles (UAVs): A showcase of whaleback yardangs in Qaidam Basin, NW China. *EPP*, 2018, vol. 2, no. 5, pp. 398–405. DOI: <https://doi.org/10.26464/epp2018037>
- [14] Сарбаев Б.С. Расчет силовой оболочки композитного баллона давления. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
- [15] Чэнь Я., Мараховский П.С., Малышева Г.В. Определение теплофизических свойств эпоксидных материалов в процессе их охлаждения. *Труды ВИАМ*, 2018, № 9. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-119-123>
- [16] Маунг П.П., Малышева Г.В. Отработка технологии изготовления рефлектора космической антенны. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2017, № 5, с. 11–15.

**Чэнь Янян** — аспирантка кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Маунг Пье Пху** — канд. техн. наук кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Малышева Галина Владленовна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Чэнь Я., Маунг П.П., Малышева Г.В. Исследование кинетики процесса отверждения тонкостенной конструкции из углепластика. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 5, с. 58–70.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-58-70>

**INVESTIGATING CURING KINETICS FOR A THIN-WALLED CARBON FIBRE STRUCTURE**

**Ya. Chen**

**P.P. Maung**

**G.V. Malysheva**

[yangyangchen@mail.ru](mailto:yangyangchen@mail.ru)

[pyaephyo@mail.ru](mailto:pyaephyo@mail.ru)

[malysheva@bmstu.ru](mailto:malysheva@bmstu.ru)

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The paper presents a computational method and an example of using it to derive parameters of a high-pressure filament-wound carbon fibre vessel designed for unmanned aerial vehicle applications. A feature of the vessel design is its variable thickness, which may result in temperature gradients, residual stresses, and diminished strength. We propose a method for assessing curing kinetics that takes into account the heat emitted during this process. We used the ESI PAM-RTM software package for simulation and determined that at the initial stage of the curing process the temperature and degree of curing in the thinner part of the product exceed those in its thicker part. As the degree of curing increases, the exothermic reaction taking place affects the temperature fields, which leads to an increase in temperatures and degree of curing in the thicker regions. In order to level the temperature gradients and degree of curing over the whole vessel, we propose to heat it at different rates. Our investigation results allowed us to establish the optimum manufacturing conditions ensuring the minimum temperature gradient values

**Keywords**

*Carbon fibre, vessel, simulation, kinetics, temperature gradient, curing*

Received 26.02.2020

Accepted 14.04.2020

© Author(s), 2020

## REFERENCES

- [1] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Novikov A.D. Prospects of increasing the dimensional stability and the weight efficiency of mirror space antenna reflectors made of composite materials. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2018, no. 1, pp. 71–83 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-71-83>
- [2] Vasil'yev V.V., Tarnopol'skiy Yu.M. *Kompozitsionnye materialy* [Composites]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990.
- [3] Zuev A.S., Emashev A.Yu., Shaydurova G.I. Analysing specifics of manufacturing items out of polymer composite materials by means of filament winding. Shaping mandrels. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2018, no. 3, pp. 4–13 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2018-3-4-13>
- [4] Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., et al. A study of epoxide–polysulfone polymer systems for high-strength adhesives of aviation purpose. *Polym. Sc. Ser. D.*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 225–229. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421217030066>
- [5] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhaylovskiy K.V., et al. Modeling the heating of the binder of polymeric composite materials using microwave radiation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2018, no. 12, pp. 83–92 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-12-83-92>
- [6] Ivanov N.V., Gurevich Ya.M., Khaskov M.A., et al. Studying of cure mode of VSE-34 binding and its influences on mechanical properties. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 2, pp. 50–55 (in Russ.).
- [7] Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Chutskova E.Yu., et al. The curing of multilayered polymer composite materials. Part 2. The molding of thick-walled glass-plastic plate. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2018, no. 6, pp. 7–14 (in Russ.).
- [8] Barinov D.Ya., Mayorova I.A., Marakhovskiy P.S., et al. Mathematical modeling of temperature fields during curing of thick-walled fiberglass plate. *Perspektivnye materialy*, 2015, no. 4, pp. 5–14 (in Russ.).
- [9] Belyakov E.V., Tarasov V.A., Boyarskaya R.V. Selection of formation modes for composite structures of rocket and space technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 5, pp. 37–43 (in Russ.).
- [10] Borodulin A.S., Marycheva A.N., Malysheva G.V. Simulation of impregnation kinetics of fabric fillers in the production of fiberglass articles. *Glass Phys. Chem.*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 660–664. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1087659615060036>
- [11] Maung P.P., Malysheva G.V. Modeling of the kinetics of impregnation process in the production of reinforced carbon-fiber reflectors for space antennas. *Vestn. Mosk. Gos.*

*Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2016, no. 5, pp. 38–47 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-5-38-47>

[12] Romeo G., Danzi F., Cestino E., et al. Design and optimization of a composite vessel for hydrogen storage subject to internal pressure and in flight loads for UAVs. *IJAS*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 124–137.

[13] Xiao X., Wang J., Huang J., et al. A new approach to study terrestrial yardang geomorphology based on high-resolution data acquired by unmanned aerial vehicles (UAVs): A showcase of whaleback yardangs in Qaidam Basin, NW China. *EPP*, 2018, vol. 2, no. 5, pp. 398–405. DOI: <https://doi.org/10.26464/epp2018037>

[14] Sarbaev B.S. Raschet silovoy obolochki kompozitnogo ballona davleniya [Power shell calculation of composite pressure cylinder]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001.

[15] Chen Ya., Marakhovskiy P.S., Malysheva G.V. Determination of thermophysical properties of epoxy materials during their curing. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 9 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-119-123>

[16] Maung P.P., Malysheva G.V. Perfection of reflector manufacture process for space antenna. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2017, no. 5, pp. 11–15 (in Russ.).

**Chen Ya.** — Post-Graduate Student, Department of Aerospace Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Maung P.P.** — Cand. Sc. (Eng.), Department of Aerospace Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Malysheva G.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Chen Ya., Maung P.P., Malysheva G.V. Investigating curing kinetics for a thin-walled carbon fibre structure. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 5, pp. 58–70 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-58-70>